УДК 621.384.647

ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ НАНОСЕКУНДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С СОГЛАСУЮЩИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман, В.В. Ежов, Д.В. Гончаров, В.С. Лопатин, А.В. Степанов, В.А. Макеев, В.И. Гусельников, Цзень Фень Ли

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: stepanov@hvd.tpu.ru

Представлена конструкция наносекундного генератора напряжения с использованием повышающего трансформатора и принудительным размагничиванием сердечника перед формированием импульса напряжения. На базе разработанного генератора создан источник наносекундного электронного пучка с параметрами: кинетическая энергия электронов 450...500 кэВ, ток пучка 6 кА, длительность импульса на полувысоте 60 нс. Генератор использовался также для формирования импульсного ионного пучка с параметрами: плотность ионного тока ~600 А/см², плотность энергии ~11 Дж/см², потенциал на аноде 300...350 кВ. В работе описана конструкция ионного диода без устройства предварительной наработки плазмы.

Введение

Сильноточные электронные пучки наносекундной длительности, с токами более 5 кА, энергией в сотни кэВ представляют интерес для прикладных исследований в области радиационной химии, плазмохимии, генерации мощного СВЧ-излучения и др. [1]. Импульсные ионные пучки используются для модификации и упрочнения поверхностного слоя режущих инструментов, подготовки поверхности для нанесения износостойких покрытий.

В сильноточных импульсных ускорителях электронов и ионов для формирования ускоряющего напряжения чаще всего используются генераторы наносекундного напряжения с одинарными и двойными формирующими линиями (ДФЛ) на деионизированной воде, трансформаторном масле или сжатом газе [1]. Для генерации пучков с энергией более 100 Дж предпочтительно использование ДФЛ на деионизированной воде. Высокая диэлектрическая проницаемость воды обеспечивает значительное снижение габаритов формирующей линии и ускорителя в целом. Но волновое сопротивление ДФЛ на основе деионизированной воды менее 10 Ом и возникает проблема согласования ДФЛ с диодом, импеданс которого значительно больше волнового сопротивления линии. В работе [2] предложено использовать для согласования повышающий трансформатор. Но авторы отмечают, что на нагрузке трансформатора (диоде) во время зарядки ДФЛ происходит формирование импульса напряжения (предимпульса), достигающего 50 % амплитуды основного импульса. Появление предимпульса напряжения на диоде сильноточного электронного ускорителя приводит к развитию взрывной эмиссии на катоде и заполнению плазмой промежутка анод-катод до начала формирования электронного пучка. При формировании рабочего импульса напряжения на диоде происходит контрагирование электронного пучка и затем возникновение дугового разряда ДФЛ. При этом происходит сильная эрозия материала тонкой анодной фольги, приводящая к ее разрушению, что снижает ресурс работы ускорителя. Для уменьшения амплитуды предимпульса при использовании согласующего (авто)трансформатора в начале цикла формирования ускоряющего импульса напряжения применено принудительное размагничивание ферромагнитного сердечника [3–5].

1. Импульсный сильноточный электронный ускоритель

Ускоритель формирует пучок электронов с энергией в импульсе 150...200 Дж, кинетической энергией электронов 450...500 кэВ и длительностью импульса на полувысоте 60 нс. На рис. 1 приведена схема ускорителя.

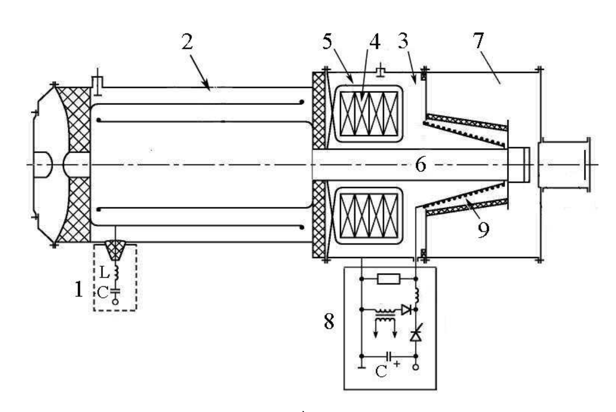


Рис. 1. *Схема ускорителя: 1) генератор импульсного напряжения Аркадьева-Маркса, 2) ДФЛ, 3) маслонаполненная камера, 4) согласующий (авто)трансформатор, 5) витки размагничивания, 6) катододержатель, 7) диодная камера, 8) блок размагничивания, 9) защитная индуктивность*

Газонаполненный генератор импульсного напряжения (ГИН) – 1 собран по схеме Аркадьева-Маркса и содержит семь ступеней конденсаторов К75–74 (40 кВ, 47 нФ) по два в каждой ступени. Разрядник первой ступени выполнен с тригатронным поджигом. Собственная индуктивность ГИНа 2,4 мкГн, ударная емкость 13,4 нФ. ДФЛ – 2 на основе деионизированной воды имеет электрическую длину 30 нс, емкость каждой линии 6,5 нФ, волновое сопротивление ДФЛ ~10 Ом. Суммарная емкость ДФЛ незначительно отличается от ударной емкости ГИНа, что обеспечивает оптимальные условия передачи энергии из ГИНа в ДФЛ.

В камере – 3 с трансформаторным маслом помещен согласующий (авто)трансформатор – 4, который содержит четыре кольцевых сердечника К360×150×25 из пермаллоевой ленты 50НП×0,01. Вокруг сердечников (в поперечном сечении магнитопровода) уложено 12 одиночных витков – 5, которые одним концом равномерно (в плоскости сердечников) распаяны к внутренней формирующей линии. Другой конец витков – 5 электрически соединен с корпусом камеры – 3. К промежутку анод-катод диода дополнительно к виткам трансформатора подключен виток, образованный катододержателем – 6, корпусами камеры – 3 и диодной камерой – 7 ускорителя. Таким образом, диод оказывается включенным по автотрансформаторной схеме с повышением напряжения в 2 раза относительно выходного напряжения ДФЛ. Использование такой трансформаторной схемы обеспечивает увеличение в 4 раза выходного сопротивления наносекундного генератора (ДФЛ+трансформатор) по отношению к волновому сопротивлению ДФЛ. Секционирование сердечника на четыре кольца позволяет снизить напряжение на межвитковой изоляции в сердечнике (MgO, нанесенный методом катафореза), и для лент толщиной 10 мкм обеспечивает коэффициент заполнения 0,72...0,80. Экспериментально измеренные потери при размагничивании пермаллоевой ленты 50НП×0,01 с размахом индукции 2,5 Тл за время 100 нс лежат в пределах 2...3 мДж/см^3 и при объеме ферромагнитного сердечника 6 дм^3 составляют 12...18 Дж.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения, формируемого ГИНом $U_{ГИН}$, и напряжения на нагрузке наносекундного генератора $U_д$.

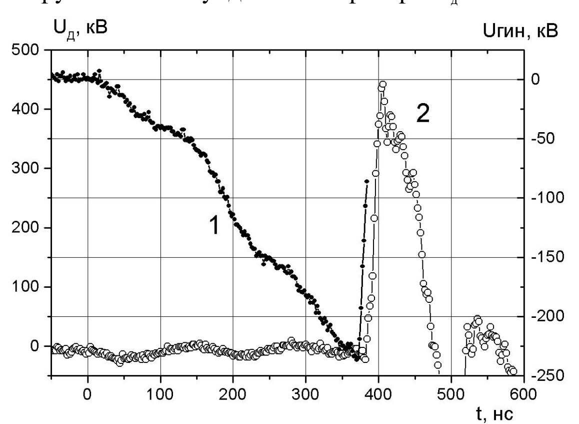


Рис. 2. *Осциллограммы напряжения, формируемого: 1) ГИНом, 2) наносекундным генератором*

Амплитуда предимпульса, формируемого в течение зарядки ДФЛ (интервал времени 0...380 нс на рис. 2), определяется начальным магнитным состоянием сердечника трансформатора. Насыщенное состояние трансформатора задается током, формируемым блоком размагничивания – 8. Ток протекает по цепи: защитная индуктивность – 9, катододержатель – 6 и витки – 5 при разряде конденсатора в блоке размагничивания. Величина энергии, запасаемой в конденсаторе, равна ~23 Дж. На рис. 3 приведена зависимость амплитуды предимпульса от величины тока размагничивания.

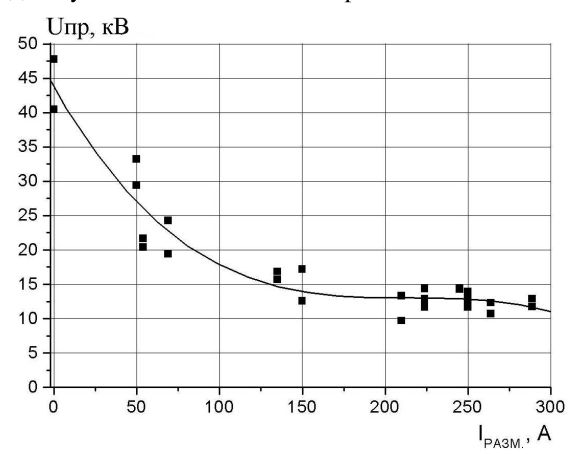


Рис. 3. *Зависимость амплитуды предимпульса $U_{пр}$, формируемого наносекундным генератором, от тока размагничивания*

Индуктивность параллельно соединенных витков размагничивания при насыщении сердечника трансформатора составляет ~0,05 мкГн и значительно меньше индуктивности ГИН (2,4 мкГн). Поэтому индуктивное падение напряжения на витках трансформатора с насыщенным сердечником мало и амплитуда предимпульса напряжения на диоде не превышает 2...3 % от амплитуды основного импульса напряжения. Таким образом, предимпульс не приводит к появлению взрывоэмиссионной плазмы в зазоре диода.

Разработанный наносекундный генератор обеспечивал стабильную работу в режиме генерации электронного тока. Были выполнены исследования стабильности работы ускорителя на частоте 5 Гц в течение 1,5 мин. Осциллограммы напряжения, формируемого ГИНом и наносекундным генератором, снимали с осциллографа Tetronix TDS5035 на видеокамеру. Затем измеряли максимальное напряжение каждой осциллограммы и заносили в таблицу. На рис. 4 приведены гистограммы напряжения, формируемого ГИНом, и напряжения на диоде, имеющие амплитуду: $U_{гин}$=240±1,2 % кВ и $U_д$=455±5,3 % кВ.

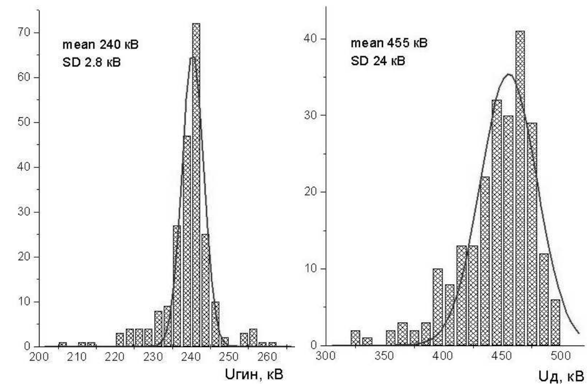


Рис. 4. *Гистограммы напряжения, формируемого генератором импульсного напряжения $U_{гин}$ и напряжения на диоде $U_д$. Частота 5 Гц. Аппроксимация гистограммы законом Гаусса*

Для анализа эффективности преобразования энергии в таблице приведены значения энергии в импульсе в различных узлах электронного ускорителя. Здесь НСГ1 соответствует полной выходной энергии наносекундного генератора, а НСГ2 – выходной энергии наносекундного генератора в течение основного импульса. Из таблицы видно, что использование трансформатора позволило значительно повысить эффективность работы наносекундного генератора и ускорителя в целом. При согласовании взрывоэмиссионного диода и формирующей линии с помощью трансформатора с принудительным размагничиванием 90...95 % энергии, подводимой к диоду, выделяется в течение основного импульса. В случае отсутствия принудительного размагничивания на формирование основного импульса расходуется не более 65 % энергии, накопленной в ДФЛ. Дальнейшее снижение потерь энергии и повышение КПД ускорителя (отношение энергозапаса ГИНа к энергии электронного пучка в импульсе) возможно при использовании разрядника формирующей линии с внешним запуском. Это снизит потери энергии из-за срабатывания разрядника не при максимальном напряжении. Применение согласующего трансформатора позволило работать с катодом диаметром 60 мм и зазором анод-катод 15...18 мм без формирования взрывоэмиссионной плазмы предимпульсом напряжения при давлении 0,1...0,01 Па.

Таблица. *Распределение энергии в импульсе в узлах электронного ускорителя, Дж*

Ускоритель	ГИН	ДФЛ	НСГ1	НСГ2	Электронный пучок
без трансформатора	380±10	290±10	90±5	58±5	15±2
с трансформатором	380±10	290±10	260±5	250±5	180±5

Применение принудительного размагничивания ферромагнитного сердечника позволило повысить стойкость анодной фольги, снизив отрицательное влияние предимпульса, и обеспечить вывод более 10^4 импульсов электронного пучка через алюминиевую фольгу толщиной 130 мкм, лежащую на опорной решетке. Разработанный импульсный электронный ускоритель использовался при проведении исследований по плазмохимическому синтезу нанодисперсных оксидов [6, 7], конверсии галогенидов [8–10], пиролизу метана [11].

2. Импульсный сильноточный ионный ускоритель

Сильноточный ионный ускоритель содержит ионный диод и описанный выше наносекундный генератор напряжения с согласующим (авто)трансформатором. Был использован ионный диод с кольцевым анодом и внешним радиальным магнитным полем, создаваемым двумя концентрическими обмотками [12]. В диоде отсутствует устройство для предварительной наработки плазмы. Контроль за параметрами работы ионного диода осуществлялся измерениями зарядного напряжения ДФЛ, импульсного напряжения с выхода наносекундного генератора и полного тока диода. Для измерения плотности ионного тока, определения энергии ионов методом измерения времени пролёта заданного расстояния, и определения момента времени старта ионов с анода использовались коллимированные цилиндры Фарадея с магнитной отсечкой электронов, устанавливаемые на расстояниях от 5 до 30 см от среза анода. Для измерения полной энергии и плотности энергии ионного пучка использовались два медных калориметра. Первый имел центральное отверстие. Вторым калориметром измерялась энергия ионного пучка, прошедшая сквозь отверстие первого калориметра.

На рис. 5 приведена схема диодного узла ионного ускорителя. Ионный диод содержит кольцевой анод – 1 и два кольцевых конусообразных катода – 2 и 3. Анод подключен к высоковольтному выводу ускорителя через разделительный разрядник на скользящем разряде. Анод изготавливался из алюминия или меди (из материала с высокой проводимостью), внешний радиус кольца R_1=75 мм, внутренний R_2=55 мм. Рабочая поверхность анода имеет кольцевые канавки, залитые диэлектриком (полиэтилен или эпоксидный компаунд).

Катоды расположены на диэлектрических каркасах – 4 и 5, внутри которых размещены электрические обмотки. Внешняя обмотка последовательно соединена с внутренней и другим выводом подключается к импульсному источнику питания. Катодная система укреплена на диске – 6 с юстировочными устройствами. Внутренний катод – 2 центрируется относительно внешнего катода тремя шпильками, в одной из которых размещен проводник для питания внутренней обмотки. Катоды выполнены из стали 1Х18Н9Т толщиной 0,8 мм. Относительно рабочей поверхности анода кромки внешнего и внутреннего катодов располагались на расстоянии 4,2±0,1 и 6,5±0,1 мм соответственно.

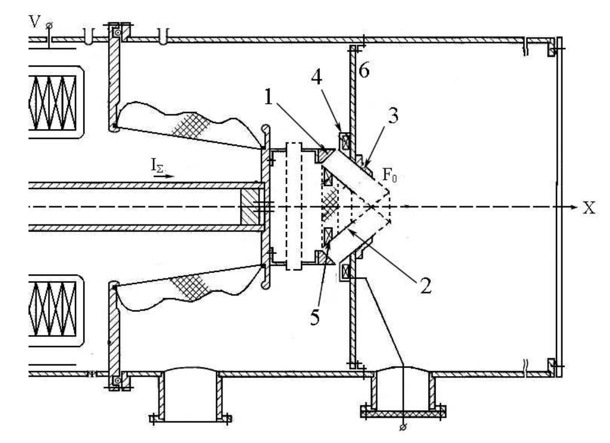


Рис. 5. *Функциональная схема диодного узла ускорителя: 1) анод; 2) внутренний и 3) внешний конусообразные катоды; 4) внешний и 5) внутренний каркасы; 6) катодный диск*

На рис. 6 приведена геометрия промежутка анод-катод ионного диода.

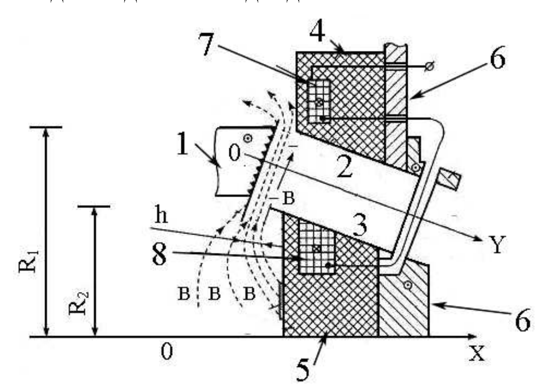


Рис. 6. *Конструкция ионного диода: 1–6) обозначения см. рис. 5; 7) внешняя и 8) внутренняя обмотки*

Распределение магнитного поля должно быть таким, чтобы для замагниченных электронов поверхности равного потенциала магнитного поля совпадали с эквипотенциальными поверхностями электрического поля при ускорении ионов в диоде. Конфигурация магнитных силовых линий в зазоре анод-катод определяется геометрией обмоток – 7 и 8 (рис. 6) и токами проводимости, наводимыми в проводящем материале анода и металлических частях катодного узла. Магнитное поле требуемой конфигурации в зазоре диода получается, если векторный магнитный потенциал обмоток на оси 0X одинаков. Это выполняется, когда число витков W и радиусы центров витков обмоток R связаны соотношением $W_1 \cdot R_1 = W_2 \cdot R_2$. Фланцы катодного диска 6 экранируют магнитный поток в области транспортировки ионного пучка и улучшают условия компенсации объемного заряда ионов медленными электронами.

Перед формированием рабочего импульса в ионном диоде насыщенное состояние сердечника согласующего трансформатора устанавливается импульсом тока блока размагничивания. Одновременно подается импульс напряжения на обмотки – 7 и 8. При достижении максимального значения магнитного поля в зазоре диода запускается наносекундный генератор импульсного напряжения, который формирует рабочий импульс напряжения на аноде. На фронте импульса напряжения происходит взрывная эмиссия электронов с острых кромок катодов – 2 и 3.

Электрическое поле E у кромок катодов имеет перпендикулярную составляющую $E_\perp$ к силовым линиям магнитного поля и параллельную $E_\parallel$, причём последняя направлена к оси 0Y с кромки обоих катодов. Для напряжения ~300 кВ, зазора $d \approx 5$ мм средняя напряжённость $E_\perp$ равна 60 кВ/мм и при индукции $B \approx 0{,}8$ Тл средняя скорость дрейфового движения равна $7 \cdot 10^7$ м/с. Электроны в дрейфовом движении за время наработки плазмы ($t_0 \ldots t_2$ на рис. 7) могут совершить почти два полных оборота у поверхности анода вокруг оси 0X. Траектория движения электронов в анод-катодном зазоре представляет собой трохоиду. Высота h трохоиды дрейфового движения электронов, направленного по оси 0Y в сторону поверхности анода, равна ≈1,06 мм. Высота трохоиды пропорциональна $E_\perp$ и зависит от продольной составляющей электрического поля $E_\parallel$. Продольная составляющая, действующая на электроны у кромок катодов, сообщает радиальный дрейф электронов к оси 0Y и начальный разброс направления движения электронов относительно вектора силовых линий магнитного поля. Поэтому величина h может изменяться от нулевого значения до ~4,3 мм.

До момента времени t_2 ионный ток отсутствует. Напряжение в диоде растёт в режиме холостого хода. Когда напряжённость электрического поля достигает некоторого порогового значения, электроны, дрейфующие по силовым линиям магнитного поля, вершинами трохоид начинают достигать поверхности анода и формировать плазму из диэлектрика и металла анода. При этом электроны достигают поверхности анода, имея максимальную скорость.

Объёмная плотность заряда во вращающемся «электроном диске» определяется потенциалом анода и равна $\rho = 0{,}1$ Кл/м³. Объёмный заряд снижает напряжённость электрического поля в области дрейфа электронов и усиливает её перед анодом, так что формируется ионный диод с малым расстоянием анод-катод и высоким потенциалом, что и обеспечивает высокие плотности ионного тока.

Косвенно высоту трохоиды h дрейфового движения электронов можно оценить по следу, оставляемому на поверхности внутреннего диэлектрического каркаса – 5, ширина которого составляет ~3,5 мм. Аппроксимируя радиальный размер этого следа по силовым линиям магнитного поля, можно оценить h в 0,5...0,7 мм, что соответствует напряжённости электрического поля ~20...30 кВ/мм в области, занятой дрейфующими электронами. Электроны, попадая на поверхность каркаса – 5, имеют энергию <30 кэВ, и их заряд стекает по поверхности на катод – 2. Отметим, что взрывная эмиссия идёт в основном с кромки катода – 2, имеющего надёжный токовый контур через диск – 6 и наименьший зазор. Дрейфовое движение ионного пучка проявлялось в следах ионных струй на поверхности катодов, которые имеют винтовую структуру с большим шагом.

Типичные эпюры напряжения наносекундного генератора, полного тока ускорителя и ионного тока в зазоре диода в согласованном режиме, привязанные во времени к напряжению, показаны на рис. 7. Полный ток диода состоит из тока ионного пучка и токов потерь. Токи потерь – это ток эмиссии электронов с кромок катодов – 1 и 2, ионизация остаточного газа, ток эмиссии электронов с фланцев – 8, 9. Доля тока ионного пучка составляет 60 % от полного тока ускорителя.

Для указанной геометрии на рис. 6 требовалось магнитное поле ~0,8 Тл, которое обеспечивала конденсаторная батарея ёмкостью 20 мкФ при напряжении 6 кВ. При значении магнитного поля в

зазоре анод-катод менее 0,64 Тл ускоритель работал в режиме, близком к короткому замыканию, и импеданс диода в течение импульса резко уменьшался. В свободном от проводящих поверхностей пространстве обмотки 7 и 8 обеспечивали магнитное поле не более 0,4 Тл. Применение сжатия магнитного потока индуцированным током в приповерхностном слое анода увеличивало поле в зазоре у поверхности анода вдвое. Ионный диод удовлетворительно работал, если остаточное давление не превышало $1,5\cdot10^{-4}$ Па.

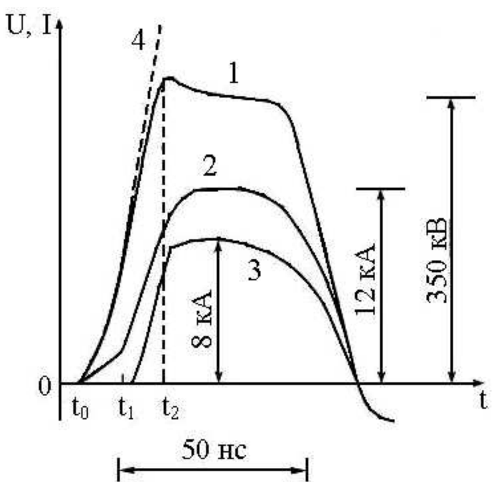


Рис. 7. *Эпюры в согласованном режиме: 1) напряжения на выходе наносекундного генератора, 2) полного тока ускорителя, 3) ионного тока, 4) напряжение холостого хода. Магнитная индукция в зазоре 0,8 Тл*

При зарядном напряжении ДФЛ 165 кВ энергия, запасаемая в формирующих линиях, составляла ~180 Дж. Энергия в импульсе, формируемом наносекундным генератором (интеграл произведения напряжения на полный ток в нагрузке генератора), составляла 150 Дж. Ионный пучок при этом имел энергию 80±5 Дж в импульсе. В плоском варианте плотность тока в кольцевом цилиндрическом пучке составляла ~100 А/см^2. При этом площадь анода равнялась 80 см^2. В конусном варианте, используя баллистическую фокусировку в фокусе пятна F_0, рис. 5, диаметром ~40 мм получена плотность ионного тока ~600 А/см^2 при плотности энергии ионного пучка ~11 Дж/см^2. Этой плотности тока было достаточно для получения абляционной плазмы и осаждения плёнок на подложках из различных материалов. Для этого распыляемый материал помещался в фокусе F_0, а подложка укреплялась на торце катодного диска – 6.

Разработанные конструкции ионного диода и наносекундного генератора с (авто)трансформатором при оптимальной величине магнитного поля 0,8 Тл обеспечили согласование волнового сопротивления формирующих линий и импеданса ионного диода. Энергия формирующих линий выделялась в первом импульсе (КПД свыше 95 %), и отсутствовали паразитные импульсные колебания, что и определило ресурс работы ионного диода больше 10^3 импульсов. Использование баллистической фокусировки в сходящемся ионном пучке позволило получить плотность ионного тока в фокусе до 600 А/см^2 при КПД диода ~60 %, потенциале на аноде ~330 кВ и длительности импульса напряжения на полувысоте 60 нс.

Заключение

Разработана конструкция наносекундного генератора с согласующим (авто)трансформатором и принудительным размагничиванием сердечника перед формированием импульса напряжения, которая обеспечила оптимальные условия для работы электронного диода с планарным взрывоэмиссионным катодом и кольцевого ионного диода. Нагрузочная характеристика наносекундного генератора позволила формировать импульсный электронный и ионный пучки с высоким КПД при изменении геометрических размеров диодов.

На базе разработанного генератора создан источник наносекундного электронного пучка с кинетической энергией электронов 450...500 кэВ, током пучка 6 кА, длительностью импульса на полувысоте 60 нс. Генератор использовался также для формирования импульсного ионного пучка с плотностью ионного тока ~600 А/см^2, плотностью энергии ~11 Дж/см^2, потенциалом на аноде 300...350 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Быстрицкий В.М., Иванов И.Б., Красик Я.Е. и др. Исследование работы наносекундного сильноточного ускорителя с индукторной секцией // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 5. – С. 122–128.
3. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 130–134.
4. Remnev G.E., Furman E.G., Pushkarev A.I., Kondratiev N.A., Goncharov D.V. High-current pulsed accelerator with matched transformer: construction and exploitation characteristics // IEEJ Transactions on fundamentals and materials. – 2004. – V. 124. – № 6. – P. 491–495.
5. Пат. на ПМ 41951 РФ. МПК^7 H05H 5/08. Импульсный электронный ускоритель / Д.В. Гончаров, Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, Э.Г. Фурман. Заявлено 15.06.2004, Опубл. 10.11.2004, Бюл. № 31.
6. Пат. 2264888 РФ. МПК^7 B22F 9/28. Способ получения нанодисперсных порошков оксидов / Д.В. Пономарев, А.И. Пушкарев, Г.Е. Ремнев. Заявлено 24.12.2003, Опубл. 27.11.2005. Бюл. № 33.
7. Ремнев Г.Е., Пушкарев А.И. Синтез наноразмерного диоксида кремния в цепном плазмохимическом процессе // Химия высоких энергий. – 2004. – Т. 37. – № 5. – С. 391–392.
8. Пушкарёв А.И., Ремнёв Г.Е., Власов В.А., Сосновский С.А., Ежов В.В. Плазмохимические процессы, инициируемые импульсным электронным пучком в газовой смеси SF_6 и N_2 // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 59–62.

9. Власов В.А., Пушкарёв А.И., Ремнёв Г.Е., Сосновский С.А., Ежов В.В., Гузеева Т.И. Экспериментальное исследование и математическое моделирование восстановления фторидных соединений импульсным электронным пучком // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 5. – С. 89–93.
10. Пат. 2228239 РФ. МПК^7 С22В 5/00, С21В 13/00. Способ прямого восстановления галогенидов / Г.Е. Ремнев, А.И. Пушкарев, М.А. Пушкарев, В.А. Красильников, Т.И. Гузеева. Заявлено 04.02.2002, Опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13.
11. Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Ежов В.В. Неравновесная плазмохимическая конверсия метана // Горение и плазмохимия: Сб. трудов III Междунар. Симп. – Алматы, 2005. – С. 157–161.
12. Лопатин В.С., Ремнёв Г.Е., Фурман Э.Г., Макеев В.А., Степанов А.В. Ионный диод с внешней магнитной изоляцией // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 4. – С. 70–75.

УДК 533.95.538.4